

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“Казанский государственный университет им. В.И.Ульянова-Ленина”**

На правах рукописи

ЮДИН Алексей Николаевич

**МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НАНОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного
состояния

А в т о р е ф е р а т

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико - математических наук

Казань 2008

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина.

Научный руководитель: - доктор физико - математических наук,
профессор

М. С. Тагиров

Научный консультант: - доктор физико - математических наук,
профессор

Д. А. Таюрский

Официальные оппоненты:

- доктор физико - математических наук,
член-корреспондент РАН

В. В. Дмитриев

- доктор физико - математических наук,
профессор

В. Д. Скирда

Ведущая организация:

- Казанский физико-технический институт
им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН

Защита диссертации состоится 27 ноября 2008 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при Казанском государственном университете (420008, г.Казань, ул.Кремлевская, 18).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского.

Автореферат разослан 27 октября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-математических
наук, профессор

М.В.Ерёмин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В последнее время множество экспериментальных и теоретических научных работ было посвящено свойствам различных наноразмерных структур. Данный интерес был вызван большой практической и научной значимостью, которое преобретают нанотехнологии. В связи с этим в данной работе рассматриваются два типа наноразмерных структур — молекулярные кластеры жидкого кислорода и нанопористые карбонизаты.

В ходе длительного изучения свойств жидкого кислорода многие научные группы высказывали предположения о наличии в нем упорядоченной наноразмерной структуры, однако ясность в данном вопросе не была достигнута. Вызывает вопрос и обнаруженное уширение линии ЭПР в жидких смесях кислорода и азота при понижении концентрации парамагнитного кислорода, которое не было объяснено.

Несмотря на существование большого числа методов исследования нанопористых веществ, в настоящее время продолжают работы, направленные на усовершенствование существующих и разработку новых порометрических методов. В связи с этим представляет интерес изучение свойств гелия-3 в контакте с карбонизатами различной пористости. В последнее время многими научными группами проводятся исследования свойств гелия-3 в пористой среде аэрогелей. Представленные в диссертации результаты получены в малоизученном диапазоне температур и магнитных полей и могут существенно дополнить проводимые в настоящее время исследования. Также отличительной особенностью пористых карбонизатов по сравнению с аэрогелями является наличие большого числа парамагнитных центров на поверхности.

На данный момент благородные газы с высокой ядерной поляризацией находят применение как в медицине, так и в самых различных областях исследований. Используемые методы поляризации благородных газов могут быть дополнены реализацией метода динамической ядерной поляризации, работа над которой долгое время ведется на базе лаборатории МРС и КЭ КГУ.

Целью настоящей работы являлся поиск субстратов — наноразмерных магнитных кластеров и нанопористых сред — для реализации метода динамической поляризации ядер ^3He .

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

- Исследование магнитных свойств жидких смесей кислорода и азота при различных концентрациях и температурах методами электронного парамагнитного резонанса и измерения магнитной восприимчивости.
- Исследование свойств гелия-3 в контакте с карбонизатами полученными пиролизом фруктозы и древесины, а также свойств ядерных и парамагнитных подсистем карбонизатов методами магнитного резонанса.
- Определение перспективности использования системы « ^3He – карбонизат», а также жидких смесей кислорода и азота для реализации метода динамической поляризации ядер ^3He .

Научная новизна работы.

- Детально исследованы спектры ЭПР жидких смесей кислорода и азота различной концентрации в широком диапазоне температур. Предложена модель кластерной структуры жидких смесей кислорода и азота, объясняющая зависимости ширины линии спектра ЭПР кислорода в данных смесях.
- Исследована система «карбонизат – ^3He » с помощью широкого спектра экспериментальных методов. Предложена модель обмена намагниченностью между парамагнитной и ядерной спиновой подсистемами в системе «карбонизат – ^3He ».
- Установлено наличие эффективной магнитной связи поверхностных парамагнитных центров с ядерными подсистемами в системе «карбонизат – ^3He ».

Научная и практическая значимость. Предложена модель образования молекулярных кластеров в жидких смесях кислорода и азота, что проливает свет на структурные свойства данных смесей и объясняет ряд экспериментально наблюдаемых эффектов. Полученные данные о свойствах карбонизатов и релаксационных свойствах гелия-3 в контакте с ними могут быть применены при реализации метода динамической поляризации ядер благородных газов.

Приведенные в диссертации результаты экспериментальных исследований свойств гелия-3 в контакте с пористыми карбонизатами могут быть использованы для разработки методов релаксационной порометрии с использованием ^3He .

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментальных исследований жидких смесей кислорода и азота методами магнитного резонанса и измерения магнитной восприимчивости.
- Модель кластерной структуры жидких смесей кислорода и азота.
- Вывод о невозможности использования жидких смесей кислорода и азота в качестве субстрата в методе динамической поляризации ядер ^3He .
- Результаты экспериментальных исследований системы «карбонизат – ^3He » методами магнитного резонанса, ЯМР-криопорометрии и электронной сканирующей микроскопии.
- Модель обмена намагниченностью между парамагнитной и ядерной спиновой подсистемами в системе «карбонизат – ^3He ». Вывод о наличии эффективной магнитной связи поверхностных парамагнитных центров с ядерными подсистемами в системе «карбонизат – ^3He »
- Вывод о возможности использования карбонизатов в качестве субстрата в методе динамической поляризации ядер ^3He .

Апробация работы.

Основные результаты работы представлялись на международных, всероссийских и университетских конференциях: «EUROMAR-2008» (СПб, 2008), Modern Development of Magnetic Resonance, «Zavoisky 100» (Казань, 2007), XXXIV совещание по физике низких температур «НТ-34» (Сочи, 2006), International Symposium on Quantum Fluids and Solids «QFS-2006» (Kyoto, Japan, 2006), III Международная Феофиловская конференция «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005), Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena «NanoRes-2004» (Казань, 2004), I Meeting “NMR in Heterogeneous Systems” (СПб, 2004), X Всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем» (Яльчик, 2003), XXXIII Совещание по физике низких температур «НТ-33» (Екатеринбург, 2003), International Symposium on Ultra Low Temperature Physics «ULT-2002» (Каназава, Япония, 2002), International Conference

on Low Temperature Physics «LT-23» (Хиросима, Япония, 2002), на Молодежных научных школах «Actual problems of magnetic resonance and its application» (Казань, 2002, 2003, 2004, 2005), конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов научно-образовательного центра Казанского государственного университета «Материалы и технологии XXI века» (Казань, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006), итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (Казань, 2002, 2003, 2004, 2006).

Публикация результатов исследований.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 5 статьях в ведущих международных научных журналах (2 публикации — в журнале, включенном ВАК в перечень изданий по диссертациям) и в 17 трудах и тезисах всероссийских и международных конференций.

Личное участие автора в получении научных результатов. Участие в постановке задач и определении экспериментальных методов их решения. Проведение экспериментальных исследований методами ядерного магнитного резонанса. Участие в проведении исследований методами ЭПР-спектроскопии (совместно с к.ф.-м.н. Маминым Г. В.) и сканирующей электронной микроскопии, в разработке моделей. Анализ и обсуждение результатов, численные оценки с помощью предлагаемых моделей (квантовохимические расчеты кластерных структур в смесях азот-кислород сделаны Аминовой Р. М.), их сравнение с полученными экспериментальными результатами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 144 наименования.

В **первой главе** содержится обзор существующих представлений о структуре жидкого кислорода и экспериментальных данных по его магнетизму, полученных различными научными группами. Описаны магнитные свойства газообразного и жидкого ^3He . Дан обзор существующих представлений о структуре пористых и нанопористых тел, рассмотрены основные свойства ядерной системы ^3He в нанопористых средах. Дано описание различных методов поляризации ядер

благородных газов. Детально описан метод ядерной динамической поляризации, приведены необходимые условия для его успешной реализации.

Во **второй главе** содержится описание используемых веществ, их характеристик, методики приготовления образцов. Описывается используемая аппаратура и методики проведения экспериментов.

В **третьей главе** приводятся результаты исследований магнитных свойств жидкого кислорода и его раствора с жидким азотом методами ЭПР и измерения магнитной восприимчивости. Выдвигается гипотеза о кластерной структуре жидкого кислорода. Приводятся данные результатов квантово-химических расчетов, указывающие на возможность молекулярной кластеризации исследуемых растворов с образованием структур типа $O_2-O_2-O_2$ и $N_2-O_2-O_2$.

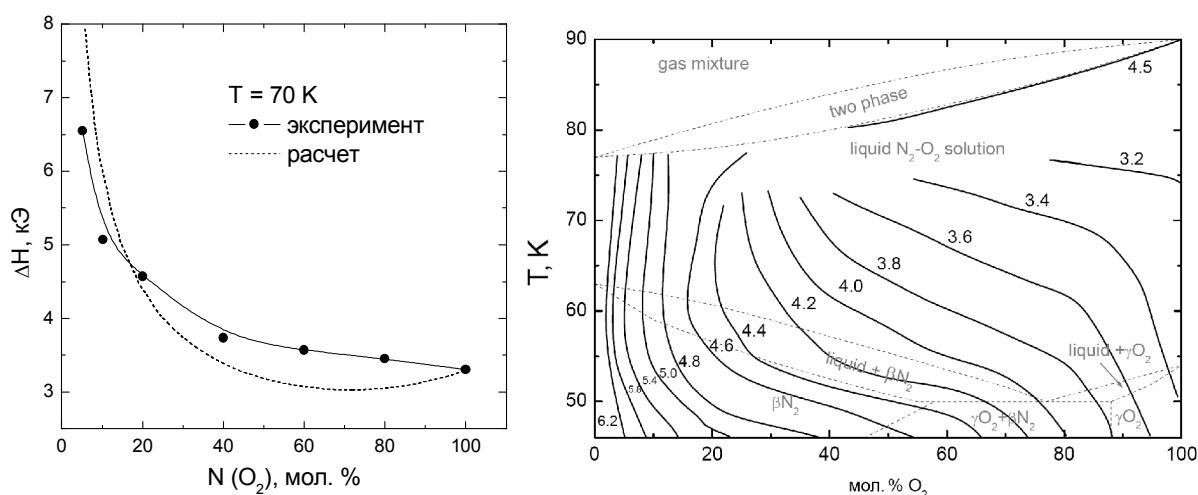


Рис. 1 Концентрационная и температурная зависимости ширины линии ЭПР. На фазовой диаграмме линии соответствуют определенной ширине спектра ЭПР (в кЭ). Фазовая диаграмма смесей составлена по данным из литературы¹.

Результаты проведенных измерений методом ЭПР представлены на рис. 1. В отличие от однородно уширенной линии, ширина которой зависит от концентрации по закону $\Delta H \sim \gamma_s \hbar N$, наблюдаемый спектр ЭПР кислорода уширялся при понижении концентрации. Из зависимостей, нанесенных на фазовую диаграмму, видно, что в области малых концентраций при переходе через линии разделения фаз ширина спектра практически не претерпевает изменений. Была выдвинута гипотеза о наличии в жидких смесях кислорода и азота при низких концентрациях упорядоченной (кластерной) структуры, близкой к структуре твердого тела.

¹ Barrett, C. S. Nitrogen–Oxygen Phase Diagram / C. S. Barrett, L. Meyer, S. C. Greer, J. Wasserman // J. Chem. Phys. – 1968. – V. 48. – P. 2670.

Положение и взаимная ориентация молекул в кластерах фиксированы, и сильное диполь-дипольное взаимодействие не усредняется, что ведет к уширению линии ЭПР.

Проведены квантовохимические расчеты по определению электронной и пространственной структуры возможных кластеров. По данным проведенных расчетов при температурах жидкого кислорода (90 K) стабильны три вида кластеров — $O_2-O_2-O_2$ (энергия связи 181 K), $N_2-O_2-O_2$ (энергия связи 164 K) и $N_2-N_2-O_2$. Пространственная структура двух типов кластеров, влияющих на уширение линии ЭПР, приведена на рис. 2.

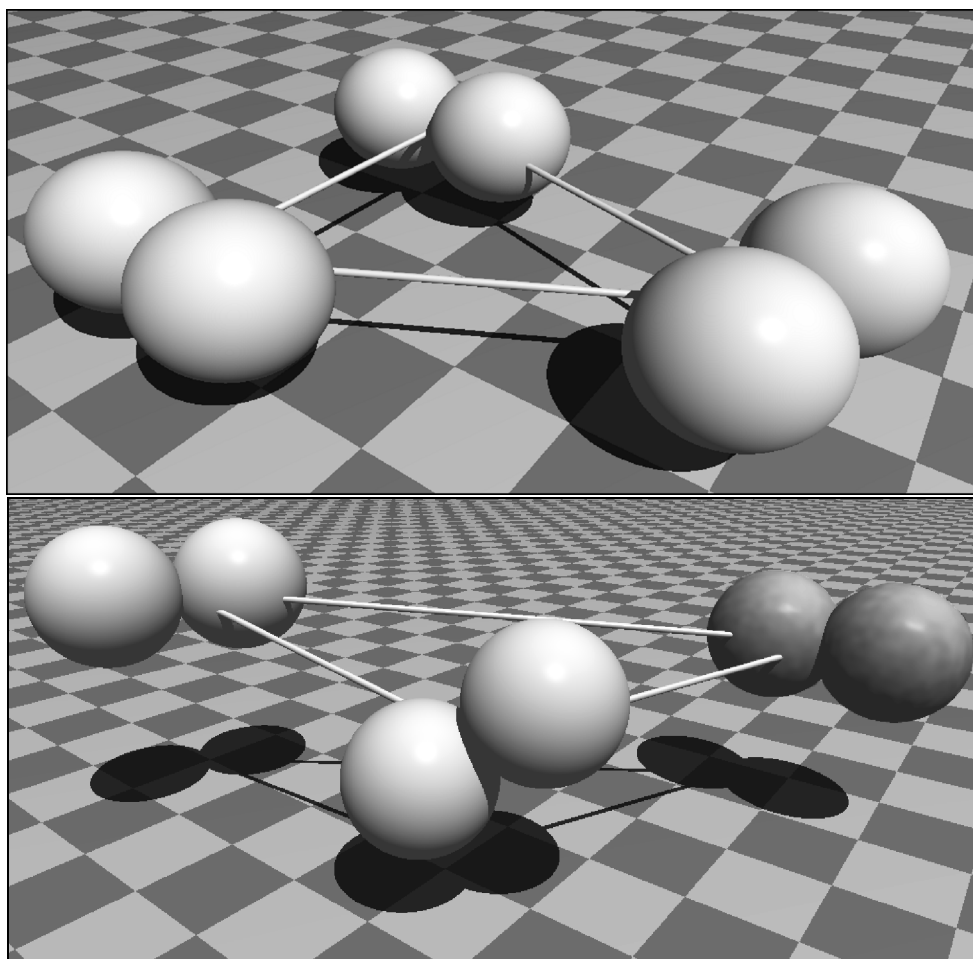


Рис. 2 Пространственная структура кластеров $O_2-O_2-O_2$ и $N_2-O_2-O_2$. Сторона квадрата на рисунке соответствует расстоянию 0,1 нм.

В рамках предложенной модели кластерной структуры возможно объяснить приведенную на рис. 1 концентрационную зависимость ширины спектра ЭПР кислорода. При малых концентрациях кислорода кластеры можно рассматривать как изолированные и невзаимодействующие, при этом диполь-дипольные взаимодействия внутри кластеров значительно уширяют линию ЭПР. При увеличении концентрации возрастает вероятность сближения кластеров, что приводит к межкластерному взаимодействию и усреднению диполь-дипольного

взаимодействия магнитных моментов ближайших кластеров и сужению линии ЭПР. Приведенная на рис. 1 расчетная кривая (пунктирная линия), полученная в рамках предложенной модели, качественно согласуется с полученными экспериментально зависимостями.

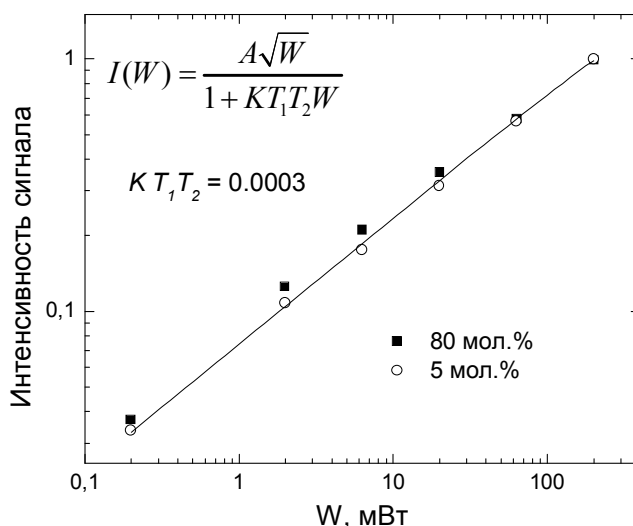


Рис. 3 Зависимость интенсивности линии ЭПР смеси азота и кислорода от мощности подаваемой СВЧ энергии.

Дополнительно была проверена возможность насыщения линии ЭПР кислорода в смеси, так как это является одним из важных параметров при реализации метода динамической поляризации ядер. Из графика (Рис. 3) видно, что линия ЭПР ни при каких концентрациях не может быть насыщена СВЧ-излучением мощностью до 200 мВт. Таким образом, невозможность насытить линию ЭПР кислорода СВЧ-излучением и чрезвычайно большая ширина спектра делают систему жидкой смеси азота и кислорода непригодной для реализации метода динамической поляризации ядер ^3He .

В четвертой главе приводятся результаты детальных исследований свойств карбонизатов с различной пористостью. Используются магнитно-резонансные методы, объектом исследования которых служат различные типы магнитных моментов: находящиеся внутри карбонизатов (ядра ^{13}C), на его поверхности (примесные ядра ^1H , поверхностные парамагнитные центры и ядра адсорбированного ^3He) и межчастичном пространстве (ядра газообразного и жидкого ^3He). Формулируется модель взаимодействия электронной и ядерных спиновых подсистем в образце.

Были исследованы образцы карбонизатов, синтезированных пиролизом фруктозы и древесины тропического южно-американского растения *Astronium*. После обработки водяным паром, измельчения и сортировки был получен набор образцов карбонизата, калиброванных по размерам частиц.

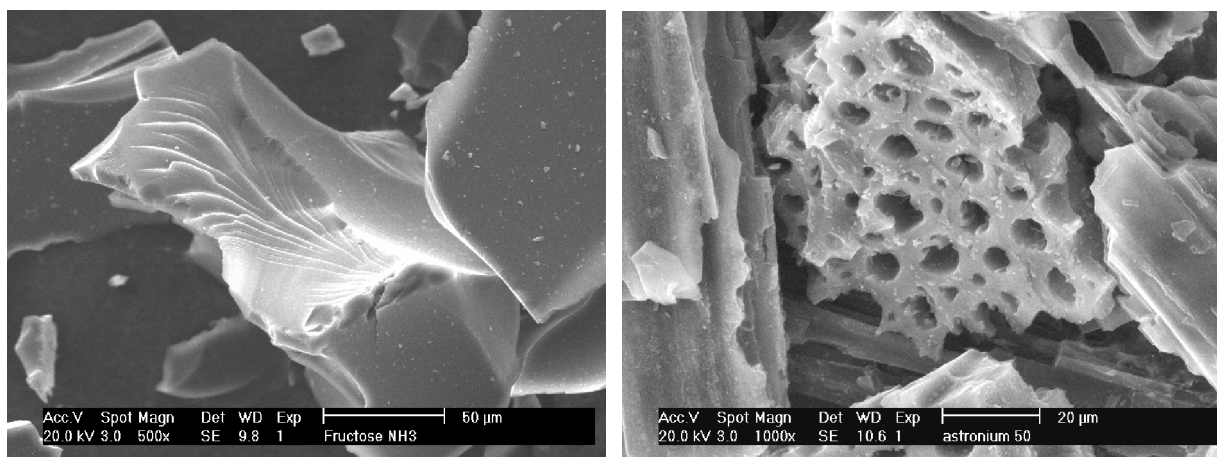


Рис. 4 Фотографии карбонизатов синтезированных пиролизом фруктозы и древесины.

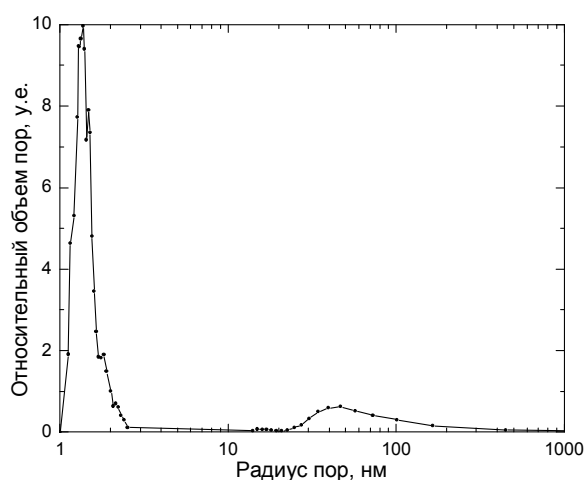


Рис. 5 Распределение пор по размерам в карбонизате фруктозы по данным ЯМР-криопорометрии

Из фотографии (Рис. 4), полученной с помощью сканирующего электронного микроскопа (Philips XL30 ESEM), видно, что поверхность карбонизата фруктозы сравнительно гладкая и не имеет крупных микропор, в то время как в древесном карбонизате «*Astronium*» наблюдаются поры размером около 5 мкм. Данные ЯМР-криопорометрии указывают на то, что в образце карбонизата «*Astronium*», как и в карбонизате фруктозы (Рис. 5), также присутствуют мелкие нанопоры размером менее 3 нм. Вследствие развитой пористости удельная поверхность карбонизата «*Astronium*» более чем на порядок выше, чем для карбонизата фруктозы.

Исследования системы парамагнитных центров карбонизатов выявило наличие обменно суженной линии ЭПР, уширяющейся при контакте с различными газами. На основании результатов измерений сделан вывод о распределении парамагнитных центров по поверхности карбонизатов, характеризуем высокой поверхностной концентрацией. Было выявлено незначительное различие в уширении линии ЭПР при контакте с газами ^4He и ^3He , различающимися наличием у последнего ядерного магнитного момента. Данный факт может свидетельствовать о магнитном контакте ядерной системы ^3He и системы поверхностных парамагнитных центров.

Измерения скорости спин-решеточной релаксации (T_1^{-1}) ядерных систем производились в диапазоне частот 4÷35 МГц по стандартной методике наблюдения за восстановлением спинового эха после насыщающего импульса («насыщение – восстановление»). Так как измеренные времена спин-решеточной релаксации достаточно короткие, то можно предположить, что основным процессом релаксации являлась релаксация ядерных магнитных моментов через парамагнитные примеси.

Были определены температурные и полевые зависимости скорости спин-решеточной релаксации ядер углерода ^{13}C , протонов ^1H и ^3He . Экспериментальные данные хорошо описывались в рамках модели релаксации ядер во флуктуирующих магнитных полях парамагнитных центров. На основании экспериментальных зависимостей и данных о характере релаксации была построена модель расположения различных магнитных подсистем в системе «карбонизат – ^3He ».

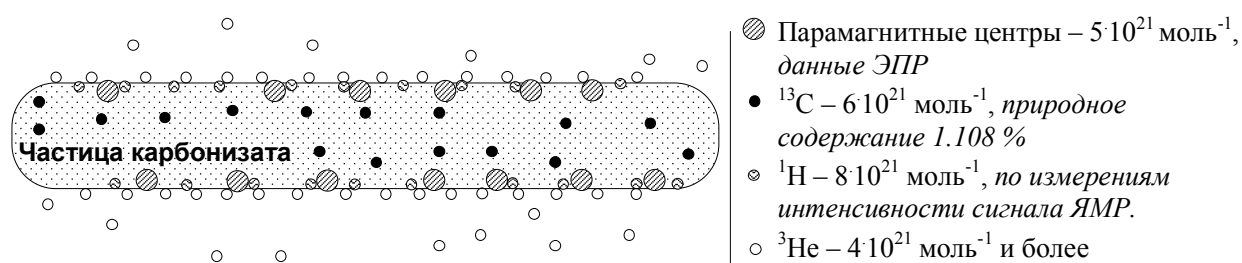


Рис. 6 Модель расположения парамагнитных центров и ядер в порошке карбонизата фруктозы.

Примерная модель расположения парамагнитных центров и резонирующих ядер в исследованных системах «карбонизат – ^3He » представлена на Рис. 6. Особенность данной системы заключается в том, что имеется парамагнитная и ряд ядерных спиновых систем, находящихся в различных условиях и пригодных для изучения методом магнитного резонанса. Это углерод ^{13}C (распространенность

1,108 %), расположенный в объеме частиц карбонизата; протоны ^1H и ПЦ, распределенные по поверхности; ядра ^3He , находящиеся в зависимости от условий в виде адсорбированной пленки на поверхности карбонизата, либо в виде жидкости или газа в поровом и межчастичном пространстве.

Были измерены величины скоростей спин-решеточной (T_1^{-1}) и спин-спиновой (T_2^{-1}) релаксации в зависимости от давления газа ^3He на частоте 20 МГц. Измерения проводились при температуре вблизи 1,5 К. Таким образом мы могли оценить влияние всех агрегатных состояний ^3He (твердая адсорбированная пленка, газ, жидкость) на ядерную магнитную релаксацию. Экспериментальные данные, полученные в ходе измерений, представлены на Рис. 7.

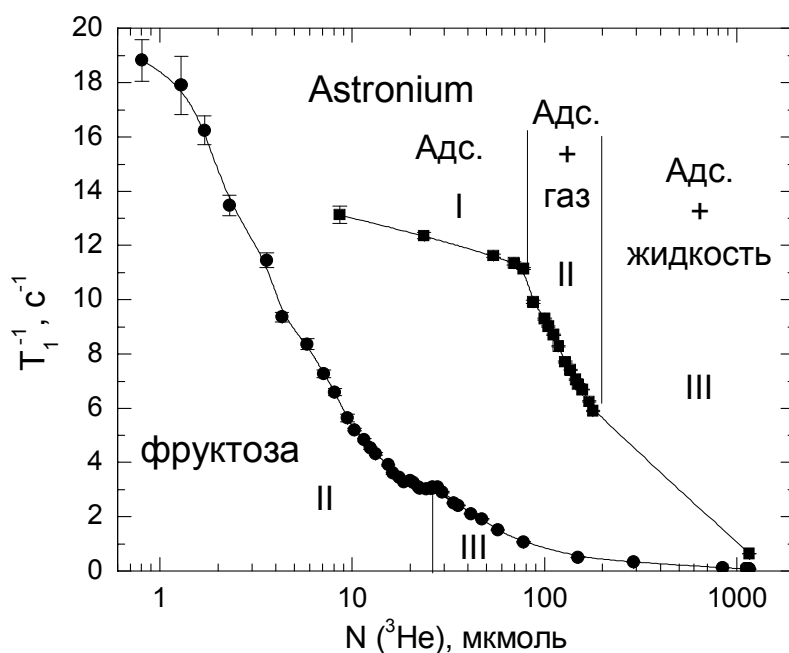


Рис. 7 Скорость ядерной спин-решеточной релаксации (T_1^{-1}) ^3He в зависимости от количества атомов гелия в системе «карбонизат– ^3He ». Области: I — адсорбированный ^3He , II — адсорбированный и газообразный, III — адсорбированный и жидкий.

Изученный в данных экспериментах диапазон концентраций атомов ^3He можно разбить на три области. При достаточно малых концентрациях (область I) атомы гелия расположены только на поверхности карбонизата. В этом случае ядра ^3He адсорбированного слоя находятся в непосредственной близости от поверхностных парамагнитных центров, которые и являются основным каналом спин-решеточной релаксации. Также в адсорбированном слое ^3He существуют

собственные механизмы релаксации², и теплоемкость данного резервуара растет пропорционально количеству адсорбированных атомов гелия, поэтому в данной области спад скорости релаксации происходит не так быстро, как в последующих.

При увеличении концентрации атомов гелия начинает появляться объемная газовая фаза, так что по отношению к атомам гелия наблюдается двухфазное состояние (область II) — адсорбированные на поверхности атомы и объемная газовая фаза. При этом может осуществляться динамический обмен между адсорбированными и свободными атомами гелия, что наряду с процессами достаточно быстрой самодиффузии атомов и спин-спиновой диффузии приводит к усреднению величины скорости T_1^{-1} . Однако эффективность канала релаксации ядер через парамагнитные центры не изменяется, а количество ядер гелия (а следовательно, и магнитная теплоемкость ядерной системы) нарастает с давлением газа. При этом, в газовой фазе уже не действуют достаточно эффективные механизмы релаксации, характерные для адсорбированного слоя ^3He . Поэтому скорость T_1^{-1} постепенно уменьшается. В области III появляется жидкий ^3He с плотностью, значительно превышающей плотность газа, и скорость T_1^{-1} достигает минимума.

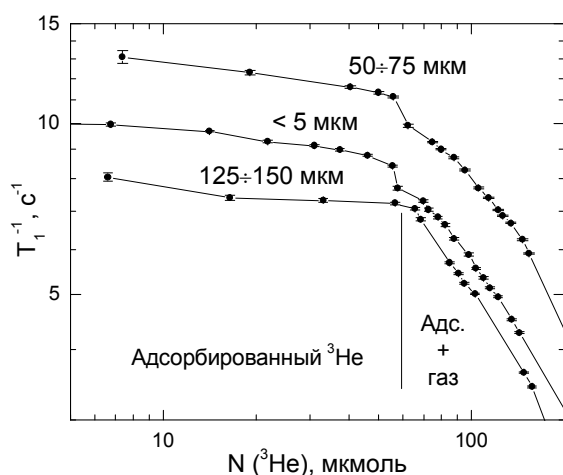


Рис. 8 Скорость ядерной спин-решеточной релаксации (T_1^{-1}) ^3He в зависимости от количества атомов гелия в образце Astronium с различным размером частиц.

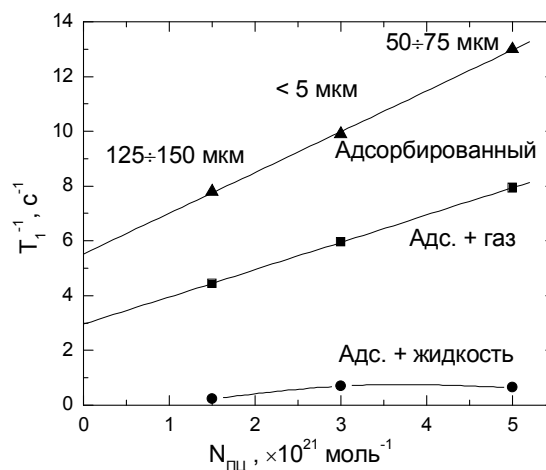


Рис. 9 Скорость ядерной спин-решеточной релаксации (T_1^{-1}) ^3He в зависимости от концентрации ПЦ в образце Astronium с различным размером частиц.

² Cowan, B. P. Nuclear magnetic relaxation in adsorbed helium-3 monolayers and other two-dimensional systems / B. P. Cowan // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1980. — V. 13. — P. 4575-4599.

Описанные измерения были проведены на образцах карбонизата Astronium с различными размерами частиц (<5 мкм, 50÷75 мкм, 125÷150 мкм). Зависимости скоростей релаксации были схожими (Рис. 8), незначительные же различия в скоростях релаксации для образцов с различными размерами можно объяснить, используя данные ЭПР-измерений. Все образцы карбонизата имели различную концентрацию поверхностных парамагнитных центров, на основе этих данных построены зависимости скорости релаксации от количества парамагнитных центров (Рис. 9). Как видно из графика, скорость спин-решеточной релаксации ^3He прямо пропорциональна концентрации ПЦ. Данный факт укладывается в описанную выше модель релаксации ядерной системы ^3He через систему парамагнитных центров, так как скорость ядерной релаксации прямо пропорциональна магнитной теплоемкости парамагнитной системы.

На основании перечисленных данных был сделан вывод о хорошей магнитной связи между системой парамагнитных центров и ядрами ^3He в системе «карбонизат – ^3He ».

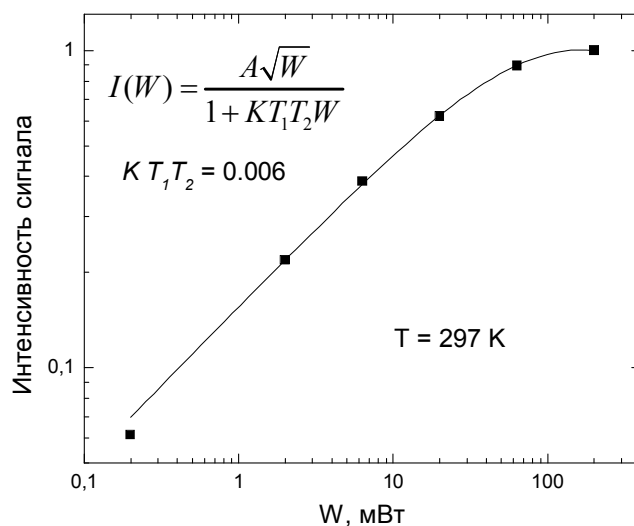


Рис. 10 Зависимость интенсивности линии ЭПР парамагнитных центров от мощности подаваемой СВЧ энергии.

С целью проверки возможности насыщения электронных переходов парамагнитных центров, нами была измерена зависимость интенсивности линии ЭПР от мощности подаваемого СВЧ-излучения (Рис. 10). Как видно, существует небольшое насыщение в этой системе, в то же время было показано наличие магнитной связи между парамагнитными центрами карбонизатов и ядрами ^3He , на основании чего можно сделать вывод о перспективности системы «карбонизат – ^3He » для реализации метода динамической поляризации ядер ^3He .

Выводы

Экспериментально исследованы жидкие смеси кислорода и азота (O_2-N_2) методами электронного парамагнитного резонанса и измерения намагниченности. Определены температурные и концентрационные зависимости ширины линии ЭПР кислорода и магнитной восприимчивости в данных смесях.

Выдвинута гипотеза о наличии в жидких смесях кислорода и азота наноразмерной кластерной структуры. Квантовохимические расчеты показывают, что устойчивыми являются кластеры состоящие из трех молекул ($O_2-O_2-O_2$, $O_2-O_2-N_2$ и $O_2-N_2-N_2$ с расстоянием между молекулами около 0,3 нм). В рамках построенной модели были определены постоянные внутрикластерного и межкаластерного взаимодействия, и объяснены температурные и концентрационные зависимости ширины линии ЭПР.

Установлено, что жидкие смеси O_2-N_2 не могут быть использована для динамической поляризации ядер 3He . Экспериментально показана невозможность насыщения линии ЭПР кислорода. Чрезвычайно большая ширина спектра кислорода ($3 \div 6$ кЭ) потенциально является дополнительным препятствием в осуществлении метода динамической поляризации ядер.

Методами ЯМР-криопорометрии и электронной сканирующей микроскопии проведены исследования структуры карбонизатов, полученных пиролизом фруктозы и древесины. Установлено наличие в карбонизатах древесины пор радиусом около 5 мкм, отсутствующих в карбонизатах фруктозы. Установлено наличие в обоих видах карбонизатов нанопор с характеристическим размером менее 3 нм.

Методами магнитного резонанса проведены экспериментальные исследования системы «карбонизат– 3He ». Предложена экспериментально обоснованная модель данной системы: ядра ^{13}C распределены по всему объему карбонизата, парамагнитные центры и ядра 1H расположены на поверхности, ядра 3He адсорбированы на поверхности и заполняют поровое и межчастичное пространство карбонизатов. Получены температурные зависимости ширины линии ЭПР парамагнитных центров карбонизатов, находящихся в вакууме и в контакте с различными газами. Определены полевые и температурные зависимости скоростей спин-решеточной релаксации ядерных подсистем. Определены зависимости

скорости спин-решеточной релаксации и скорости релаксации поперечной составляющей намагниченности ядерной системы ^3He от давления и количества гелия-3 в системе «карбонизат – ^3He ».

Установлено, что поверхностные парамагнитные центры в исследованных карбонизатах характеризуются высокой поверхностной концентрацией, их линия ЭПР обменно сужена и парамагнитная система имеет хорошую магнитную связь с исследованными ядерными подсистемами, в том числе с ядерной системой гелия-3. Спектр ЭПР поверхностных парамагнитных центров может быть насыщен электромагнитным СВЧ-излучением. На основании перечисленных данных сделан вывод о возможности использования карбонизатов в качестве субстратов для реализации метода динамической поляризации ядер ^3He .

В экспериментах по адсорбции гелия-3 выявлена существенная роль моноатомных адсорбированных слоев ^3He в общей картине релаксации ядерной системы ^3He в контакте с древесными карбонизатом в отличие от карбонизатов полученных пиролизом фруктозы. Данные по релаксации поперечной составляющей намагниченности адсорбированного слоя ^3He объяснены в рамках модели двумерной кристаллической решетки.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Tagirov, M. S. On the magnetism of liquid nitrogen – liquid oxygen mixture / M. S. Tagirov, R. M. Aminova, G. Frossati, V. N. Efimov, G. V. Mamin, V. V. Naletov, D. A. Tayurskii, **A. N. Yudin** // Physica B. – 2003. – V. 329-333. – P. 433-434.
2. Mamin, G. V. The possible dynamic polarization of nuclei by using coal surface paramagnetic centers / G. V. Mamin, H. Suzuki, M. S. Tagirov, V. N. Efimov, **A. N. Yudin** // Physica B. – 2003. – V. 329-333. – P. 1237-1238.
3. Мамин, Г. В. Ядерная спин-решеточная релаксация в мелкодисперсных порошках карбонизатов / Г. В. Мамин, Х. Сузуки, М. С. Тагиров, Д. А. Таюрский, **А.Н. Юдин** // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 79. – С. 778-782.
4. Мамин, Г. В. Влияние фазовых превращений гелия-3 в порах древесного карбонизата на спиновую кинетику ядер ^3He / Г. В. Мамин, М. С. Тагиров, Д. А. Таюрский, **А. Н. Юдин**, Р. Л. Белфорд, П. Дж. Церок, Б. М. Одинцов // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – С. 43-46.

5. Tagirov, M. S. Nuclear Spin-Kinetics of ^3He in Carbonizates with Various Porosity / M. S. Tagirov, **A. N. Yudin**, G. V. Mamin, A. A. Rodionov, D. A. Tayurskii, A. V. Klochkov, R. L. Belford, P. J. Ceroke, B. M. Odintsov // J. Low Temp. Phys. – 2007. – V. 148. – P. 815-819.
6. Tagirov, M. S. On the magnetism of liquid nitrogen-liquid oxygen mixture / M. S. Tagirov, R. M. Aminova, G. Frossati, V. N. Efimov, G. V. Mamin, V. N. Naletov, D. A. Tayurskii, **A. N. Yudin** // The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002. – P. 407
7. Tagirov, M. S. Magnetism of noble gases adsorbed at charcoal surface / M.S. Tagirov, V.N. Efimov, G. Frossati, V. V. Naletov, G.V. Mamin, D. A. Tayurskii, H.Suzuki, **A.N. Yudin** // International Symposium on Ultra Low Temperature Physics, Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002. – P. 45
8. Налётов, В. В. Динамика спин-системы ^3He в контакте с активированным углем / В. В. Налётов, М. С. Тагиров, **А. Н. Юдин** // Актуальные проблемы магнитного резонанса и его приложений, Российская молодежная научная школа «Новые аспекты применения магнитного резонанса», Казань, 20-22 ноября 2002, Труды. – С. 216–220
9. Налётов, В. В. Динамика спин-системы ^3He в условиях гетерогенной среды активированных углей / В. В. Налётов, М. С. Тагиров, Д. А. Таюрский, **А. Н. Юдин** // XXXIII Совещание по физике низких температур, Екатеринбург, 17-20 июня 2003 г., Тезисы докладов секции Q и L. – С. 36-37
10. **Юдин, А. Н.** Спиновая кинетика в системе угольный адсорбент — газообразный и жидкий гелий-3 / **А. Н. Юдин**, Г. В. Мамин, В. В. Налётов, М. С. Тагиров // Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. – Казань: Изд-во КГУ. – 2003. – Вып. X. – Ч. 3. – С. 17–20
11. **Юдин, А. Н.** Кластерная структура жидкого кислорода и особенности его магнитных свойств / **А. Н. Юдин**, Р. М. Аминова, В. Н. Ефимов, Г. В. Мамин, Д. А. Таюрский, М. С. Тагиров // Структура и динамика молекулярных систем. Сборник статей. – Казань: Изд-во КГУ. – 2003. – Вып. X. – Ч. 3. – С. 161–163

12. **Юдин, А. Н.** Данные ЯМР о спиновой кинетике в системе угольный адсорбент – гелий-3 / **А. Н. Юдин**, Г. В. Мамин, В. В. Налётов, М. С. Тагиров // Актуальные проблемы магнитного резонанса и его приложений, Российская молодежная научная школа «Новые аспекты применения магнитного резонанса», Казань, 11-13 ноября 2003г., Д-39
13. **Yudin, A. N.** Nuclear relaxation in carbon-based chars / **A. N. Yudin**, G. V. Mamin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, H. Suzuki, B. M. Odintsov, R. B. Clarkson // International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter”, I Meeting “NMR in Heterogeneous Systems” St.Petersburg, 12-16 July 2004, Book of abstracts. – P. 77
14. **Yudin, A. N.** Nuclear spin-lattice relaxation in carbon-based chars, New aspects of magnetic resonance application / **A. N. Yudin**, G. V. Mamin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, H. Suzuki, B. M. Odintsov, R. B. Clarkson // Proceedings of the VIII International Youth Scientific School “Actual problems of magnetic resonance and its application”, 15-19 August 2004, Kazan. – P. 114
15. Tagirov, M. S. Nuclear magnetic relaxation in finely dispersed carbonizate powders / M. S. Tagirov, G. V. Mamin, H. Suzuki, D. A. Tayurskii, **A. N. Yudin**, B. M. Odintsov, R. B. Clarkson // Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena, Kazan, Russia, 15-19 August 2004, Abstracts. – P. 25
16. **Yudin, A. N.** Nuclear Spin Kinetics of ^3He during Phase Changes in the Pores of Charcoals / **A. N. Yudin**, G. V. Mamin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii // IX International Youth Scientific School Actual problems of magnetic resonance and its application, Kazan, 13-18 June 2005. Proceedings. – P. 111-113
17. Мамин, Г. В. Магнитные свойства системы «жидкий кислород – жидкий азот» / Г. В. Мамин, Р. М. Аминова, Д. А. Таюрский, М. С. Тагиров, Х. Сузуки, В. Н. Ефимов, **А. Н. Юдин** // III Международная конференция «Фундаментальные проблемы физики» 13-18 июня 2005 года, Казань. Сборник тезисов. – С. 152
18. Tagirov, M. S. Helium-3 phase change influence on nuclear spin-kinetics of ^3He in carbonizates with different porosity / M. S. Tagirov, G. V. Mamin, D. A. Tayurskii, **A. N. Yudin**, R. L. Belford, P. J. Ceroke, B. M. Odintsov // International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed

- Matter”, 3rd Meeting “NMR in Heterogeneous Systems” St.Petersburg, 9-13 July 2006, Book of abstracts. – P. 108
19. Mamin, G. V. Phase Transitions and Nuclear Spin-Kinetics of ^3He in Carbonizates with Various Porosity / G. V. Mamin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, **A. N. Yudin**, R. L. Belford, P. J. Ceroke, B. M. Odintsov // International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Kyoto, Japan, August 1-6, 2006. – PE 21
 20. Мамин, Г. В. Влияние фазовых превращений гелия-3 в карбонизатах с различной пористостью на спиновую кинетику ядер ^3He / Г. В. Мамин, М. С. Тагиров, Д. А. Таюрский, **А. Н. Юдин**, R. L. Belford, P. J. Ceroke, Б. М. Одинцов // Сборник трудов XXXIV совещания по физике низких температур (НТ-34), Сочи, 26-29 сентября 2006 г. – Т. 1. – С. 206
 21. **Yudin, A. N.** Nuclear Spin-Kinetics of ^3He in Paramagnetic Carbonizates with Various Porosity / **A.N. Yudin**, G.V. Mamin, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, A.A. Rodionov, A.V. Klochkov, R.L. Belford, P.J. Ceroke, B.M. Odintsov // Abstracts of the International conference “Modern Development of Magnetic Resonance”, 24-29 September 2007, Kazan. – P. 270
 22. **Yudin, A. N.** Influence of surface properties and porosity of carbonisates on nuclear spin-kinetics of ^3He / **A. N. Yudin**, M. S. Tagirov, G. V. Mamin, A. A. Rodionov, D. A. Tayurskii, A. V. Klochkov, R. L. Belford, P. J. Ceroke, B. M. Odintsov // Euromar 2008, St. Petersburg, Russian Federation, July 6-11 2008, Book of Abstracts. – P. 138